电容积分式放射性活度计的研制

何铭蔓　张京隆　杨洪
（成都理工大学 核技术与自动化工程学院　成都　610059）

摘要　在现场快速准确地实现放射性核素活度测量在放射性医学诊断中具有重要作用。本文采用电容积分式的电路结构，设计了低噪声前置放大器电路，并与高精度信号采集与处理电路相配合，成功研制了弱电流测量电路，实现了 20 fA～10 μA 弱电流测量。结合前端井型电离室，搭建了电容积分式放射性活度计的原型装置。测试结果表明：本文研制的放射性活度计重复性与商用 RM-905A 性能基本一致，本底小于 0.065 MBq，重复性不超过 0.84%，不稳定性为 1.94%。

关键词　放射性活度计，　4πγ 电离室，　电容积分式 *I-V* 转换，　现场可编程门阵列

中图分类号　TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.XXXX.hjs.XX.XXXXXX

Development of a capacitance-integrating radioactivity meter

HE Mingman　ZHANGE Jinglong　YANG Hong
(*College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*)

Abstract　**[Background]** Rapid and accurate measurements of radionuclide activities in the field play an important role in radiological medical diagnosis. **[Purpose]** This study aims to develop a capacitance-integrated activity meter. **[Methods]** A circuit structure of the capacitive-integral type was adopted, and a low-noise preamplifier circuit was designed. The designed structure was matched with high-precision signal acquisition and processing circuit to successfully develop a weak current measurement circuit, achieving weak current measurements ranging from 20 fA to 10 μA. **[Results]** The test results show that the repeatability of the proposed radioactivity meter is consistent with the performance of the commercial RM-905A, with a background lower than 0.065 MBq, a repeatability not exceeding 0.84%, and an instability of 1.94%. **[Conclusions]** We designed a capacitive integral weak-current preamplifier and built a prototype radioactivity meter device.

Key words　Radioactivity meter, 4πγ ionization chamber, Capacitance integral circuit, Field programmable gate array

在核医学中，放射性药物剂量的可靠性以及准确性是医学诊断与治疗成功的一个重要因素[1]。为了确保用药剂量准确，需对药品中放射性核素的活度进行测量。随着核医学技术的发展，越来越多的放射性核素（^{131}I、^{99m}Tc、^{18}F、^{177}Lu 等）投入到临床诊断与治疗中，而这些药物活度测量通常使用的工具是放射性活度计，它是临床核医学中最重要的仪器之一[2]。

目前国外相当多的医疗器械公司研制了放射性活度计，占领了主要的市场份额。其中最常见的

国家自然科学基金项目(No.11805023)资助
第一作者：何铭蔓，女，1999 年出生，2022 年毕业于天津职业技术师范大学，研究领域为核电子学
通讯作者：张京隆，E-mail: zhangjinglong17@cdut.edu.cn
收稿日期：2023-9-28，修回日期：2023-11-30
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11805023)
First author: HE Mingman, female, born in 1999, graduated from Tianjin Vocational and Technical Normal University in 2022, focusing on nuclear electronics
Corresponding author: ZHANG Jinglong, E-mail: zhangjinglong17@cdut.edu.cn
Received date: 2023-9-28, revised date: 2023-11-30

是美国的 Capintec. Inc.公司研制的 CRC-55tR 型活度计。其内部存储了 80 多种核素的信息，测量范围达到 0.1 MBq~250 GBq，精度优于±2%，测量极低活度的样品响应时间不超过 16 s[3]。除此之外，还有德国 NUVIATECH 公司研制的一款 ISOMED 2010 型[4]、英国国家物理实验室研制了一款 Fidelis 型[5]等放射性活度计都在市场上占有一定的份额。同时，国内也有少量活度计产品，如 RM-905A 活度计，该活度计能够以 2%的精度测量活度范围为 0.1 MBq~300 GBq（^{99m}Tc）的核素样品，可以满足大多数核素活度的测量工作[6]。

另一方面，放射性活度计本质上是对电离室输出的宽量程弱电流测量，宽量程弱电流（飞安到微安级）测量是放射性活度计研制的关键难点之一[7]。目前大部分放射性活度计的生产厂商都未公开其活度计中弱电流读出方式，而公开文献中绝大多数研究均采用跨阻型电路结构完成电离室的信号读出电子学设计[8-11]，但由于量程宽，需采用多个硬件档位切换导致电路复杂度增加[10-11]。

电容反馈积分法是另一种宽量程弱电流测量方法，该方法利用电容积分的原理，将探测器输出端直接连接到一个电容上，通过测量电容两端的电压来反推探测器输出电流。该方法的电路结构简单，仅用 1 个电容即可完成飞安级到微安级电流的测量，测量过程规避了电阻元件向电路引入的噪声电流，再配合高效的信号处理算法可以大大减少响应时间，该方法已在其它领域有所使用[12-13]。因此，本文尝试采用电容积分式的电路结构，设计放射性活度计的信号读出电路，并详细介绍相关的电路设计和测量结果。

1 整体方案

整个系统由 4πγ 电离室、弱电流前置放大器、高压产生电路、信号采集处理电路以及计算机软件组成，系统结构如图 1 所示。高压产生电路为 4πγ 电离室提供负高压，将需要测量的放射性样品放置在 4πγ 电离室中，不同活度和不同种类核素将产生不同大小的电流，电流通过弱电流前置放大器后将产生“锯齿形”的电压信号，随后电压信号发送到信号采集处理电路中进行模数转换和电压值与时间间隔测量，测量的结果以一定的时间间隔发送到计算机中进行显示和分析。

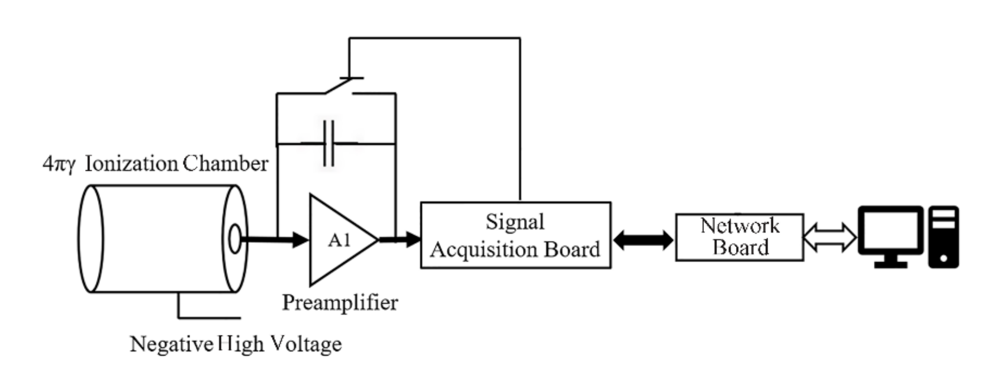


图 1 放射性活度计系统结构
Fig.1 Structure of activity meter system

1.1 核素校正因子的模拟

在 4πγ 电离室中，电离室输出电流（I）与放射性核素活度（A）的关系为：

$$A=\frac{I}{\delta_X} \quad (1)$$

式中：δx为核素校正因子，常见核素校正因子与电离室的结构相关。在实验前期，由于实验室不具备标准活度的医用放射源，为了初步验证电流测量结果的正确性，使用 Geant4 模拟软件[14]对当前设计中拟采用的电离室进行了模拟，得到不同核素的校正因子。在世界体（world）中构建了一个与现实中尺寸相符的井型电离室，本文选用的电离室由北京金鼎胜达科贸有限公司生产，外径为 145 mm，高 320 mm，内径为 50 mm，使用不锈钢作为井内薄壁材料，腔室内充有 6.5 个大气压的混合气体（70%氩气与 30%氙气），气体密度 3.49 kg·m^{-3}（单位）。井型电离室在程序中与射线作用，如图 2 所示。

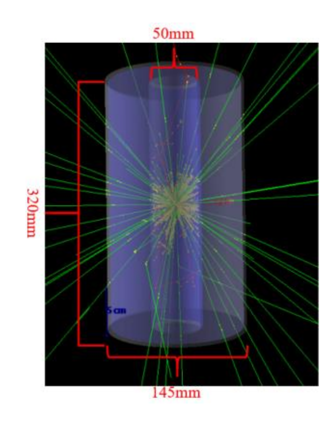


图 2 Geant4 中的电离室模拟模型
Fig.2 Model of ionization chamber simulation in Geant4

根据电离室的机械结构，模拟得到不同核素的校正因子如表 1 所示。

表 1 常见核素校正因子模拟结果
Table 1 Factors of simulation results for common nuclide correction

核素名称 Nuclide	校正因子 Correction factor / pA·MBq^{-1}
^{22}Na	8.252
^{60}Co	7.200
^{99m}Tc	3.699
^{131}I	2.357
^{137}Cs	2.297
^{201}Tl	2.876
^{241}Am	0.350
^{226}Ra	7.035

1.2 宽量程电流测量方案的设计

根据电容积分基本原理，电路计算得到的电流I_{avg}可由式（2）给出[13]：

$$I_{avg} = -\frac{\Delta V \times C_f}{\Delta t} \quad (2)$$

式中，Δt为前放输出信号测量时间间隔；ΔV为前放输出信号在Δt内电压变化量；C_f为反馈电容容值。由式（2）可知，电流的测量问题最终可转换成电压变化率大小的问题，由于理想状态下反馈电容固定值，只要在固定时间间隔下测量输入信号电压在这段时间内的变化，就可以计算出被测电流的大小。

对于信号采集处理电路来讲，可以同时测量信号电压和时间的变化，因此，在电路标定后可以直接得到待测电流值，部分电流值测量示意图如图 3 所示。

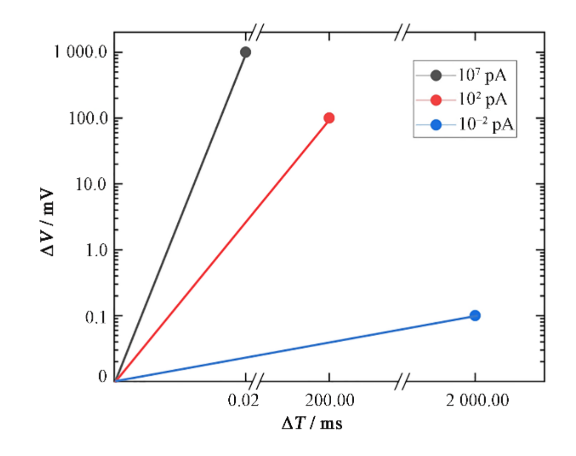


图 3 部分电流值测量示意图
Fig.3 Plot of partial current measurement values

对于本文研制的放射性活度计，其输出电流在 10^{-2}～10^{7} pA 之间。考虑到本信号采集处理电路在电压分辨（约 0.1 mV）和时间分辨（约 25 ns）上的极限值，可以选择合适的反馈电容以满足 20 fA～10 μA 的电流测量，目前本方案采用反馈电容为 200 pF，设计的电流测量方案如表 2 所示：

表 2 电流测量方案
Table 2 Solutions of current measurements

待测电流 Current to be measured / pA	Δt 的选择 Option of Δt / ms	ΔV 的选择 Option of ΔV / mV
1×10^{-2}	2000	0.1
1×10^{-1}	200	0.1
1×10^{0}	200	1
1×10^{1}	200	10
1×10^{2}	200	100
1×10^{3}	200	1000
1×10^{4}	0.02	1
1×10^{5}	0.02	10
1×10^{6}	0.02	100
1×10^{7}	0.02	1000

从表 2 可以看出，只要在信号采集处理电路内部选择合适的Δt，测量对应信号的电压，即可计算出对应的电流。在本方案中，选择同时在Δt为 2 000 ms、200 ms、0.02 ms 处测量信号电压（这在现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array，FPGA）内部非常容易实现），再根据当前信号电压大小选择合适的电压值，即可反推得到当前待测电流值。

2 电路

2.1 弱电流前置放大器

4πγ 电离室输出电流与放入井中的样品活度大小成正比，输出电流信号往往具有电流值较小且电流输出范围宽的特点[15]。采用电容反馈方式进行反馈前置放大器的设计，实现了 *I-V* 转换，可以在不需要更换档位的条件下，配合高采样率的模数转换器（Analog-to-Digital Converter，ADC），对整个量程内的电流进行测量。

运算放大器、反馈电容以及充放开关的选取是设计弱电流前置放大器的关键，由于前置放大器的偏置电流会一直在反馈电容上积分，会造成测量结果偏大，因而选择偏置电流与失调电压尽量低的运算放大器。除此之外，反馈电容应该具有高绝缘电阻、高品质因数（Q>0.99）、低损耗角（D<0.01）、温度系数小等特征[16]，而云母电容器具有良好的稳定性、温度系数小，适合本电路中对于反馈电容的要求；与此同时，反馈电容值过大过小也会影响其最终性能。而充放电开关则需选取体积小、漏电流小、开关速度快、寿命长的干簧管继电器。

综上考虑，弱电流前置放大器的核心芯片为 LMC6001，在反向输入端和输出端跨接高稳定性的反馈电容 C_f，型号为 CD15FD201FO3F，通过高绝缘干簧管继电器 K1 切换可以实现宽量程微弱电流测量[15]，型号为 Coto Techenology 公司推出的 2200 系列中的 2301 型继电器，利用信号采集处理电路中的 FPGA 控制继电器 K1 的通断，电路原理图如图 4 所示。

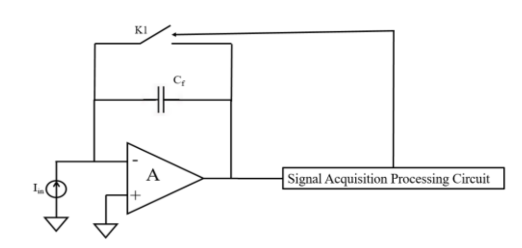


图 4 弱电流前置放大器原理图
Fig.4 Schematic of weak current preamplifier

2.2 信号采集处理电路

信号采集处理电路包含信号调理与滤波电路、ADC、FPGA 与以太网数据传输电路。ADC 选用 Linear Technology 公司推出的 LTC2247 芯片，可对弱电流前置放大器产生的电压信号进行模数转换。

为了实现数据的在线实时的采集与处理，信号经 ADC 模数转换后，再发送到 FPGA 进行处理。FPGA 芯片采用国产高云公司，型号为 GW2A-LV18QN88C8/I7，其主要完成 2 个工作：1）控制弱电流前置放大器反馈电容的充放电；2）处理 ADC 转换后的数字信号。

FPGA 固件包含以下模块：ADC 数据接口、弱电流前置放大器、数字信号处理程序以及指令解析中心，如图 5 所示。

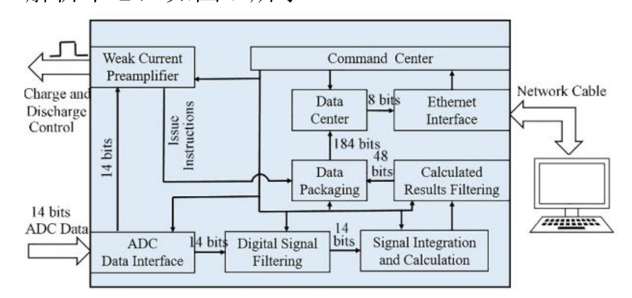


图 5 FPGA 固件设计框架
Fig.5 Framework of FPGA firmware design

当 ADC 采集的数据进入 FPGA 内部后，分别发送给数字信号滤波模块与弱电流前置放大器模块，数字信号滤波模块用于降低信号本身噪声；弱电流前置放大器模块中的电磁继电器用于控制反馈电容充放电。经过滤波后的数字信号会被按照一定的时间间隔对信号进行积分，积分后的信号用于计算其变化率。由于同样大小的信号变化率不会有较大差距，因而可对计算结果进行一次均值滤波，最后将结果与弱电流前置放大器模块中的电磁继电器开断序次打包，通过以太网通信协议上传回上位机软件。

当开始测量时，弱电流前置放大器模块在测量时间段内一直处在监控 ADC 输出值的状态，通过将 ADC 采集的数字值与软件设定的上下阈值作比较，判断电路该充电或放电。在弱电流前置放大器的反馈电容充电时，FPGA 电路管脚输出高电平，反馈电容放电时，FPGA 电路管脚则输出低电平，如图 6 所示。在整个测量过程中，测量电路会重复上述行为，形成“锯齿状”信号，该信号实际上是电压与时间的关系。

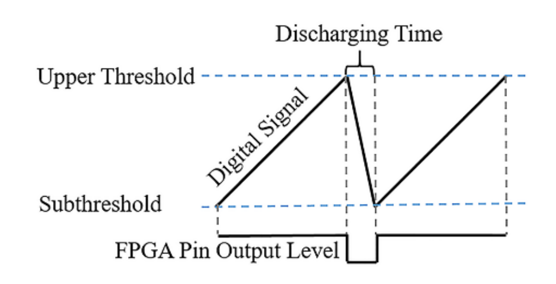


图 6 FPGA 固件控制反馈电容充放电逻辑
Fig.6 Logic of FPGA firmware control of feedback capacitor charge/discharge



图 7 放射性活度计内部系统结构实物图
Fig.7 Photograph of internal system structure of radioactivity meter

3 实验

实验主要包含电路测试与活度计活度测量，放射性活度计内部系统结构实物图如图 7 所示。其中电路测试包含准确性与线性度实验；活度测量包含本底、重复性、稳定性以及将测试结果与 RM-905A 测量结果对比实验。

3.1 电路整体性能测试

弱电流前置放大器是活度计的核心之一，其弱电流是否测量准确，将直接影响对放射性样品活度的测量结果。因此，对本设计中活度计的弱电流前置放大器展开了准确性测试和线性度测试。

3.1.1 准确性

在保持测试平台处于稳定的环境条件下，使电流源输出 20 fA~10 μA 的电流，将测量值记录在表 3 中，其中输入电流值为吉利时 6517B 静电计所测的电流值。

表 3 弱电流前置放大器准确度测试
Table 3 Values of weak current preamplifier accuracy

输入电流值 Input current value	测量值 Measured value	偏差 Deviation	备注 Note
20.00 fA	19.13 fA	0.86 fA	绝对偏差 Absolute deviation
62.03 fA	64.46 fA	2.43 fA	绝对偏差 Absolute deviation
114.60 fA	113.19 fA	1.40 fA	绝对偏差 Absolute deviation
1.05 pA	1.05 pA	0.267%	相对偏差 Relative deviation
5.27 pA	5.31 pA	0.876%	相对偏差 Relative deviation
1.85 nA	1.85 nA	0.221%	相对偏差 Relative deviation
81.00 nA	81.02 nA	0.029%	相对偏差 Relative deviation
10.05 μA	10.05 μA	0.007%	相对偏差 Relative deviation

分析表 3 数据可知，弱电流前置放大器具有检测电流低至 20 fA 的能力，在 20 fA~114 fA 的电流范围内绝对误差不超过 3 fA，其余测试电流结果相对误差均不超过 0.876%，说明弱电流前置放大器的性能完全可以满足 4πγ 电离室放射性活度计在一般使用情况下的要求。

3.1.2 线性度

弱电流前置放大器线性度的测试方法为，使电流源产生 20 fA～10 uA 电流，将其输入到电路中测试电路的线性度，将测量数据进行处理后得到图 8 所示的结果。

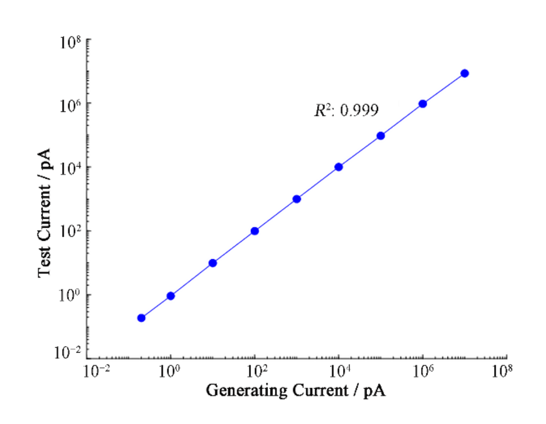


图 8 弱电流前置放大器线性度测试
Fig.8 Plot of weak current preamplifier linearity

从图 8 可以看出，不论是在小电流还是大电流的测量下，本设计中弱电流前置放大器的拟合优度都优于 0.999，说明其具有很好的线性度。

3.2 放射性活度计测试

测试项目依照放射性活度计检定规程：JJG 377-2019[17]进行，对电容积分式放射性活度计进行了本底测试、重复性测试、稳定性测试以及将测试结果与 RM-905A 测量结果对比。

3.2.1 本底

活度计的本底测试指活度计处在稳定的环境中时，不在其井中放入任何放射源进行测试。根据“放射性活度计”国家标准可知，“I 级”活度计为标准级活度计，主要用于科学实验和测试检验机构；“II 级”活度计为工作级活度计，主要用于医用和放射性药物生产厂商[18]。在测试时使用 ^{99m}Tc 的校正因子将测试所得的电流值换算为活度值小于$A_b \leq 3.7\times10^5$ Bq（即电流小于 1.369 pA），就可达到II级活度计标准。

测量前进行一次本底扣除（调零），测试时间为 5 s，得到未调零前的本底测量结果为-1.287 pA，略小于 II 级标准。完成调零后，随后继续进行 500 s 测试，每 5 s 得一次本底结果，结果如图 9 所示。

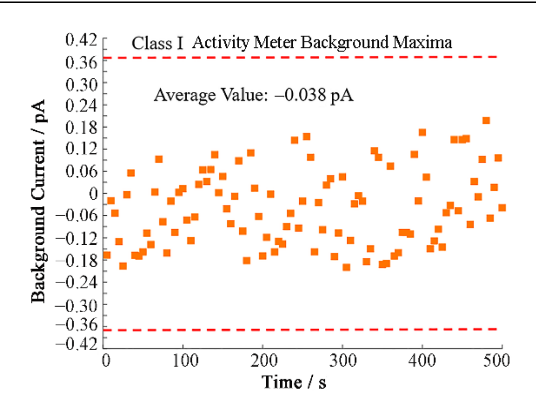


图 9 自研活度计调零后本底活度值

Fig.9 Background activity value after zeroing of self-developed actuators

从图 9 可以看出，在实际测量时，扣除平均值（调零）后，自研活度计的本底电流平均值为 0.038 pA，最大偏差为 0.235 pA（利用 ^{99m}Tc 换算出的活度为 0.064 MBq）。已经远小于 II 级活度计本底要求，达到 I 级活度计（0.1 MBq）本底要求。

3.1.2 重复性

扣除活度计的本底电流后，对 ^{137}Cs、^{60}Co 以及 ^{226}Ra 这 3 种放射性核素进行了 10 次重复性测试，重复性 V 的计算方式[17] [19]如下式：

$$V=\frac{1}{\bar{A}}\sqrt{\frac{1}{n-1}\times\sum_{i=1}^{n}\left(A_i-\bar{A}\right)^2}\times100\% \qquad (3)$$

计算可得重复性测量结果均不超过 0.84%，达到国家标准中 I 级放射性活度计的要求，如表 4 所示。

表 4 自研活度计电离室输出电流测试结果

Table 4 Results of self-developed activity meter ionization chamber output current test

核素 Nuclide	平均值 Average value / pA	标准偏差 Standard deviation / pA	重复性 Repeatable / %	活度平均值 Average ativity / MBq
^{137}Cs	409.304	0.480	0.12	177.957
^{60}Co	3.607	0.030	0.84	0.501
^{226}Ra	25.261	0.106	0.42	3.593

3.2.3 稳定性

为了验证自研活度计是否具有短期的稳定性，使用核素 ^{60}Co 进行了短期测试，活度计共测试了 8 h，每 15 min 测一次活度值，整理数据后结果如图 10 所示。

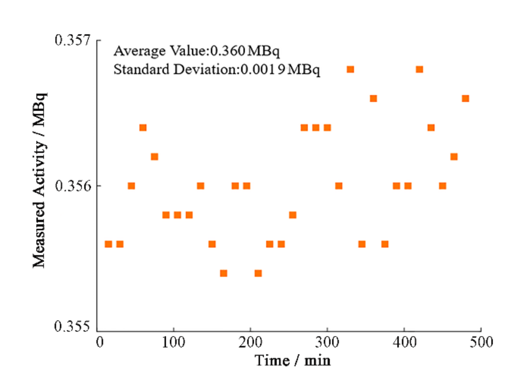


图 10 自研活度计短期稳定性测试

Fig.10 Short-term stability test of self-developed activity meter

由图 10 可知，自研活度计在 8 h 测量中，平均值为 0.360 MBq，标准偏差为 0.0019 MBq，经计算其不稳定性为 1.94%，不稳定性达到了 I 级放射性活度计标准，这也说明自研活度计在长期测试中，仍然稳定，不会出现较大偏差。

3.2.4 RM-905A 与自研活度计结果对比

商用放射性活度计 RM-905A 的测量平均值与自研活度计的测量平均值对比结果如表 5 所示。

表 5 RM-905A 与自研活度计测量结果对比
Table 5 Comparison of measurement results between RM-905A and self-developed activity meter

核素 Nuclide	RM-905A 测量值 RM-905A measured values / MBq	RM-905A 重复性 RM-905A repeatable / %	自研活度计测量值（采用模拟校正因子） Self-developed activity meter measurements (using analogue correction factors) / MBq	自研活度计测量值（采用 RM-905A 标定后） Measured values of self-developed activity meter (after calibration using RM-905A) / MBq	自研活度计重复性 Self-researching activity meter repeatability / %
^{137}Cs	191.780	0.75	177.957	191.695	0.12
^{60}Co	0.445	1.18	0.501	0.445	0.84
^{226}Ra	4.103	0.10	3.593	4.109	0.42

上述测试可得到以下结论：

1）自研活度计与商用 RM-905A 在不同活度核素下的重复性指标基本一致，重复性不超过 0.84%。

2）自研活度计未使用标准放射源进行标定的测量值与 RM-905A 相对误差较大，这是因为模拟与实际之间的偏差以及放射源本身尺寸影响导致。

3）自研活度计通过标定后，其测量平均值与商用 RM-905A 所测平均值最大仅相差 0.085MBq，这说明自研活度计能够准确的进行活度测量。

4 结论

弱电流的准确测量是放射性活度计研制的关键问题之一，本文设计了电容积分式弱电流前置放大器，并搭建了放射性活度计原型装置。弱电流前置放大器的测试结果表明，在测量 20~114 fA 的电流时绝对误差不超过 3 fA，其余电流测量结果相对误差均小于 0.876%，实现了 20 fA～10 μA 弱电流的准确测量，拟合优度优于 0.999。放射性活度计的测试结果表明，自研活度计本底约小于 0.065 MBq，核素活度测量重复性不大于 0.84%，不稳定性测试结果为 1.94%。本文的电路设计原理和信号处理方法也可为其它宽量程弱电流测量应用提供参考。

作者贡献说明

何铭蔓负责系统的搭建、测试工作、文章的起草及最终版本修订；张京隆负责研究的提出、设计及文章的审阅；杨洪负责资料收集、电路设计以及 FPGA 程序。

参考文献

1 范我. 用于肿瘤治疗的放射性药物[J]. 国外医学(放射医学核医学分册), 2004(1): 21 – 25. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2004.01.009.
FAN Wo. Radiopharmaceuticals for tumor therapy[J]. Foreign Medical Science Section of Radiation Medicine and Nuclear Medicine, 2004(1): 21 – 25. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2004.01.009.

2 刘辉, 范振芳, 李璟瑜, 等. 医用放射性活度计性能测试及分析[J]. 中国医学装备, 2017, **14**(3): 28 – 31. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2017.03.007.
LIU Hui, FAN Zhenfang, LI Jingyu, *et al*. The test and analysis for performance of medical radioactivity meter[J]. China Medical Equipment, 2017, **14**(3): 28 – 31. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2017.03.007.

3 Esquinas P L, Tanguay J, Gonzalez M, *et al*. Accuracy, reproducibility, and uncertainty analysis of thyroid-probe-based activity measurements for determination of dose calibrator settings[J], Medical Physics, 2016, **43**(12): 6309-6321.

4 Bauwens M, Pooters I, Cobben R, *et al*. A comparison of four radionuclide dose calibrators using various

radionuclides and measurement geometries clinically used in nuclear medicine[J]. Physica Medica: PM: an International Journal Devoted to the Applications of Physics to Medicine and Biology: Official Journal of the Italian Association of Biomedical Physics (AIFB), 2019, **60**: 14 – 21. DOI: 10.1016/j.ejmp.2019.03.012.

5 Norhayati A, Abdul A M R, Muhammad J M I, *et al*. Intercomparison programme of dose calibration used in nuclear medicine center in Malaysia[EB/OL].[2010-07-01] https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21578715.

6 王式琦，安晶刚. RM—905a 标准级活度计的性能考查研究[J]. 中国医学装备, 2007, **4**(6): 17 – 19. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8270.2007.06.006.

WANG Shiqi, AN Jinggang. The performance check study of the RM—905a standard grade radioactive meter[J]. China Medical Equipment, 2007, **4**(6): 17 – 19. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8270.2007.06.006.

7 马国华. 4πγ 电离室放射性核素活度计[J]. 现代计量测试, 2002, **10**(2): 11 – 15. DOI: 10.16428/j.cnki.cn11-4827/t.2002.02.003.

MA Guohua. 4πγ ionization chamber radionuclide activity meter[J]. Modern Measurement and Test, 2002, **10**(2): 11 – 15. DOI: 10.16428/j.cnki.cn11-4827/t.2002.02.003.

8 Okazaki Y, Tanaka T, Saito N, *et al*. Subfemtoampere resolved ionization current measurements using a high-resistance transimpedance amplifier[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, **71**: 1 – 8. DOI: 10.1109/TIM.2022.3164155.

9 Hsieh C W, Chen C Y. Noises depression based on statistic analysis algorithm for Kerma area product meter design[C]//2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). May 14-17, 2018, Houston, TX, USA. IEEE, 2018: 1 – 5. DOI: 10.1109/I2MTC.2018.8409592.

10 张远东. 基于 4πγ 电离室的新型核素活度测量系统的研制[D]. 北京：中国地质大学(北京), 2021. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000783.

ZHANG Yuandong. Development of a new radionuclide activity measurement system based on 4πγ ionization chamber[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000783.

11 张远东，曾卫华，侯胜利，等. 4πγ 电离室活度计电流检测装置设计[J]. 核电子学与探测技术, 2021, **41**(2): 209 – 213. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.02.005.

ZHANG Yuandong, ZENG Weihua, HOU Shengli, *et al*. Design of current detection device for 4πγ ionization chamber activity meter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2021, **41**(2): 209 – 213. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.02.005.

12 李钢，杨仲秋，杨斌，等. 电容积分弱电流测量 *I*/*F* 变换电路[J]. 核电子学与探测技术, 2022, **42**(2): 317 – 321. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2022.02.020.

LI Gang, YANG Zhongqiu, YANG Bin, *et al*. Capacitance integration weak current measurement *I*/*F* conversion circuit[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2022, **42**(2): 317 – 321. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2022.02.020.

13 Mohanan S K, Boukabache H, Perrin D, *et al*. Comparative analysis of ultra-low current measurement topologies with implementation in 130 nm technology[J]. IEEE Access, 2021, **9**: 63855 – 63864. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074464.

14 Agostinelli S , Allison J , Amako K ,et al.Geant4—a simulation toolkit[J].Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3):250.DOI:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

15 倪宁. 高气压电离室微弱电流信号测量技术研究[D]. 成都：成都理工大学, 2013.

NI Ning. Study on measurement technology of weak current signal in high pressure ionization chamber[D].Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.

16 赵旭，倪宁，张庆贤，等. 基于电流频率变换法的微弱电流测量电路[J]. 核技术, 2022, **45**(2): 020401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020401.

ZHAO Xu, NI Ning, ZHANG Qingxian, *et al*. A current to frequency conversion based circuit for low-level current measurement[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(2): 020401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020401.

17 国家市场监督管理总局. 放射性活度计检定规程: JJG 377—2019[S]. 北京：中国标准出版社, 2020.

State Administration for Market Regulation. Radioactivity Meters: JJG 377—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

18 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 放射性活度计: GB/T 10256—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Radioactivity meter: GB/T 10256—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

19 陈靖, 梁珺成, 赵清. 医用核素活度计的校准方法[J]. 中国计量, 2007(10): 73－74. DOI: 10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2007.10.058.

CHEN Jing, LIANG Juncheng, ZHAO Qing. Calibration method of medical radionuclide activity meter[J]. China Metrology, 2007(10): 73－74. DOI: 10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2007.10.058.